

文章编号: 1009-6744 (2012) 01-0160-06

# 城市常规公交子系统能耗模型研究

唐旭南, 张秀媛\*, 孙浩

(北京交通大学, 交通运输学院, 100044)

**摘要:** 城市公交子系统,即地面的电汽车公交系统,作为城市交通系统的重要组成部分其能源消耗量日趋增大,而对城市公交子系统能源消耗结构的研究还不成熟,从可持续发展的角度考虑,迫切需要研究城市公交子系统的能源消耗情况.本文分析了城市常规公交子系统能源消耗结构,考虑公交车辆全寿命周期中的能源消耗,通过引入能源费率参数,建立了城市常规公交子系统能耗模型,并对模型进一步处理得到其分解模型.以北京市常规公交子系统为案例,测算了2010年北京市常规公交子系统的全寿命周期成本、能源费率和能源消耗费用,并对所得结果进行比较分析,对城市公交子系统的结构调整给出合理性的建议.

**关键词:** 城市交通; 公交子系统; 能源消耗模型; 能源费率; 全寿命周期成本

中图分类号: U121

文献标识码: A

## Energy Consumption Models for Urban Bus Transport

TANG Xu-nan, ZHANG Xiu-yuan, SUN Hao

(School of traffic and transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The sub-system of urban public transit is the public transportation system on the ground. It is an important part of urban transport system and its energy consumption is increasing in these years. Because the researches on the energy consumption structure of urban public transit system are still not mature, exploring the energy consumption of urban public traffic system from the perspective of sustainable development is urgently needed. Considering the life cycle of the public vehicle energy consumption, this paper analyzes the energy consumption structure of urban public transit system. The energy consumption structure is established by introducing the energy cost rate parameters. It takes the public transit system of Beijing for example to calculate the life cycle of the public vehicle energy consumption, energy cost rate parameters and the energy consumption cost in 2010. Furthermore, the paper analyzes the case results and gives reasonable suggestions on restructuring urban public traffic system.

**Key words:** urban traffic; sub-system of public transit; energy consumption model; energy cost rate; life circle costing

**CLC number:** U121

**Document code:** A

收稿日期: 2011-10-25

修回日期: 2011-12-15

录用日期: 2011-12-28

基金项目: 国家社会科学基金(11BTJ016); 北京交通大学基金(KMJB10024136).

作者简介: 唐旭南(1987-), 男, 满族, 河北承德人, 硕士生.

\* 通讯作者: xzhang@bjtu.edu.cn

## 1 引言

随着我国经济的快速发展、城市规模的不断扩大,居民出行频率和居民出行数量也不断地增加。考虑到相关政策的影响,以及居民对出行的经济、快捷、安全等方面的综合考虑,选择使用公共交通方式出行的人数越来越多,城市公共交通系统所面临的压力随即不断加大。而城市公交子系统作为城市公共交通系统的主体,其能源消耗必将不断加大。目前我国城市公交子系统仍以燃油消耗为主,而以可再生能源为动力的交通工具发展缓慢,各种类型的公交车构成比例有待改善,因此研究城市常规公交子系统能源消耗结构对公交系统的结构调整和能源节约具有非常重要的意义。

目前有关城市公交子系统能源消耗的研究相对较少,未形成较系统的研究成果。国内外学者更关注于对交通能源消耗的结构和评估方法的探讨。陈亚妮和龚凌凌从交通方式结构入手<sup>[1-2]</sup>,给出了交通能耗分析,但是对于城市公共交通的结构与能源消耗研究还很少,也是发展城市公共交通亟待探索的内容之一。张明<sup>[3]</sup>等学者基于LMDI方法分解分析中国特大城市客运交通能源消耗,给出了有益的思路。James Cooper<sup>[4]</sup>等把交通运输、城市结构和运输环境问题相结合,建立一个评价城市交通能源的公共平台,平台中涵盖了常规的交通模型、居民住房情况和能源评估的方法。Jeffrey Skeera和Yanjia Wang<sup>[5]</sup>按照客运周转量和货运周转量与GDP增长的历史关系,根据弹性系数法预测未来年交通部门的能源消耗强度,进而预测交通行业的能源消耗量。

本文通过对不同类型公交车进行全寿命周期成本分析,构建了基于能源费率的城市公交子系统能源消耗模型,以2010年北京市常规公交车为例,计算了现有公交车车型的全寿命周期成本、能源费率和能耗费用,并对结果进行了详细的分析。

## 2 公交车辆全寿命周期成本分析

公交车辆全寿命周期成本<sup>[6-7]</sup>是指在公交车辆生命周期内购买车辆和运行消耗材料所产生的费用,运行过程中能源消耗所产生的费用,对车辆进行维修保养所产生的费用以及相应配套设施建设和运营所产生的费用的总和。概括起来就是由购置成本、运行成本、维修保养成本、其他成本四部分构成。为了计算城市公交子系统的年度能耗费用,

文中采用了计算公交车年均全寿命周期成本的方法。

第 $j$ 类公交车全寿命周期成本计算公式为

$$M_{Tj} = M_{Pj} + M_{Rj} + M_{Mj} + M_{Oj} \quad (1)$$

式中  $M_{Tj}$  ——第 $j$ 类公交车的全寿命成本;

$M_{Pj}$  ——第 $j$ 类公交车的购置成本;

$M_{Rj}$  ——第 $j$ 类公交车的运行成本;

$M_{Mj}$  ——第 $j$ 类公交车的维护保养成本;

$M_{Oj}$  ——第 $j$ 类公交车的其它成本。

$j$  ——不同类型公交车,其中 $j = 1$ 代表柴油车, $j = 2$ 代表天然气车, $j = 3$ 代表混合动力车, $j = 4$ 代表电车, $j = 5$ 代表纯电动车, $j = 6$ 代表汽油车。

公交车全寿命周期成本中的四个组成部分的结构如下。

### (1) 购置成本。

将车辆运行消耗的材料以及购车所产生的费用按照车辆的寿命折算到单车购置成本之中即购置成本。第 $j$ 类公交车的购置成本计算公式为

$$M_{Pj} = \frac{M_{Pjb}}{Y} + \frac{M_{Pjo}}{X_j} \quad (2)$$

式中  $M_{Pjb}$  ——第 $j$ 类公交车的车辆购置费用;

$M_{Pjo}$  ——第 $j$ 类公交车的购置其它车耗材料的费用;

$Y$  ——全车寿命;

$X_j$  ——第 $j$ 类公交车购置的其它车耗材料的使用年限。

### (2) 运行成本。

车辆运行中消耗的能源费用即为运行成本。第 $j$ 类公交车的运行成本计算公式为

$$M_{Rj} = L_j \cdot G_{jk} \cdot p_k \quad (3)$$

式中  $L_j$  ——第 $j$ 类公交车的单车年均行驶里程;

$G_{jk}$  ——第 $j$ 类公交车的百公里能耗,其中 $k = 1$ 代表柴油, $k = 2$ 代表天然气, $k = 3$ 代表电能, $k = 4$ 代表汽油;

$p_k$  ——第 $k$ 类能源的单价。

### (3) 维护保养成本。

维护保养成本是指公交车每年定时维护保养所消耗的成本。第 $j$ 类公交车的维护保养成本计算公式为

$$M_{Mj} = \frac{M_{MjT}}{H_{MjT}} \quad (4)$$

式中  $M_{MjT}$  ——第 $j$ 类公交车维护保养年度总费用;

$H_{MjT}$  ——第  $j$  类公交车年度维护保养车辆总数.

(4) 其它成本.

其它成本主要是指公交车相关的配套设施建设及运营费用,按照公交车型的不同其它成本也各不相同,如柴油车加注尿素的费用和纯电动车的电池租赁费用.第  $j$  类公交车的其它成本计算公式为

$$M_{Oj} = \sum_{n=1}^5 M_{Ojn} \quad (5)$$

式中  $M_{Ojn}$  ——第  $j$  类公交车的其它成本中的第  $n$  部分成本.

当  $n = 1$  时,  $M_{Oj1}$  表示第  $j$  类公交车的其它成本中的尿素加注成本,计算公式为

$$M_{Oj1} = L_j \cdot G_{jm} \cdot p_m \quad (6)$$

式中  $M_{Oj1}$  ——第  $j$  类公交车的其它成本中的尿素加注成本;

$G_{jm}$  ——第  $j$  类公交车的百公里尿素加注量;  
 $p_m$  ——尿素单价.

当  $n = 2$  时,  $M_{Oj2}$  表示第  $j$  类公交车的其它成本中的加油站设施建设及运营成本,计算公式为

$$M_{Oj2} = \frac{W_{ab}}{Y_a H_a} + \frac{W_{ar}}{H_a} \quad (7)$$

式中  $M_{Oj2}$  ——第  $j$  类公交车的其它成本中的加油站设施建设及运营成本;

$W_{ab}$  ——加油站建设总费用;  
 $W_{ar}$  ——加油站年运营费用;  
 $Y_a$  ——加油站使用年限;  
 $H_a$  ——加油站年均服务车辆数.

当  $n = 3$  时,  $M_{Oj3}$  表示第  $j$  类公交车的其它成本中的加气站设施建设及运营成本,计算公式为

$$M_{Oj3} = \frac{W_{bb}}{Y_b H_b} + \frac{W_{br}}{H_b} \quad (8)$$

式中  $M_{Oj3}$  ——第  $j$  类公交车的其它成本中的加气站设施建设及运营成本;

$$C = \sum_j \frac{\left( \frac{M_{Pjb}}{Y} + \frac{M_{Pjo}}{X_j} \right) + (L_j \cdot G_{jk} \cdot p_k) + \frac{M_{MjT}}{H_{MjT}} + \sum_{n=1}^5 M_{Ojn}}{L_j} \cdot L_j \cdot \alpha_j \cdot Q \quad (12)$$

式中

$$M_{Oj} = \sum_{n=1}^5 M_{Ojn} = M_{Oj1} + M_{Oj2} + M_{Oj3} + M_{Oj4} + M_{Oj5} = L_j \cdot G_{jm} \cdot p_m + \left( \frac{W_{ab}}{Y_a H_a} + \frac{W_{ar}}{H_a} \right) + \left( \frac{W_{bb}}{Y_b H_b} + \frac{W_{br}}{H_b} \right) + \left( \frac{M_R + M_T}{Q_j} \right) + M_{Oj5} \quad (13)$$

$W_{bb}$  ——加气站建设总费用;

$W_{br}$  ——加气站年运营费用;

$Y_b$  ——加气站使用年限;

$H_b$  ——加气站年均服务车辆数.

当  $n = 4$  时,  $M_{Oj4}$  表示第  $j$  类公交车的其它成本中的电池租赁及电池更换成本,计算公式为

$$M_{Oj4} = \frac{M_R + M_T}{Q_j} \quad (9)$$

式中  $M_{Oj4}$  ——第  $j$  类公交车的其它成本中的电池租赁及电池更换成本;

$M_R$  ——第  $j$  类公交车的电池租赁总费用;

$M_T$  ——第  $j$  类公交车的电池更换总费用;

$Q_j$  ——第  $j$  类公交车的保有量.

当  $n = 5$  时,  $M_{Oj5}$  表示第  $j$  类公交车的其它成本中除以上四种成本以外的成本.

### 3 城市常规公交子系统的能耗模型构建

在常规公交子系统中,将每类公交车的全寿命周期成本分配到这类公交车的年均行驶里程上,可得到车辆行驶单位里程能源消耗的费用支出即能源费率,单位为元/公里,用  $\eta$  表示.能源费率的计算公式为

$$\eta_j = \frac{M_{Tj}}{L_j} \quad (10)$$

式中  $\eta_j$  ——第  $j$  类公交车的能源费率.

从车辆的整体经济性考虑能源消耗,构建城市公交子系统能耗模型<sup>[8]</sup>为

$$C = \sum_j \eta_j \cdot L_j \cdot \alpha_j \cdot Q \quad (11)$$

式中  $C$  ——常规公交系统总能耗费用;

$\alpha_j$  ——公交车结构比例;

$Q$  ——公交车总保有量;

$\eta_j$  ——第  $j$  类公交车的能源费率.

将式(1) - 式(10)代入式(11)中得到

通过以上处理可以得到基于能源费率的城市 公交子系统能耗模型的能耗结构关系如图 1 所示。

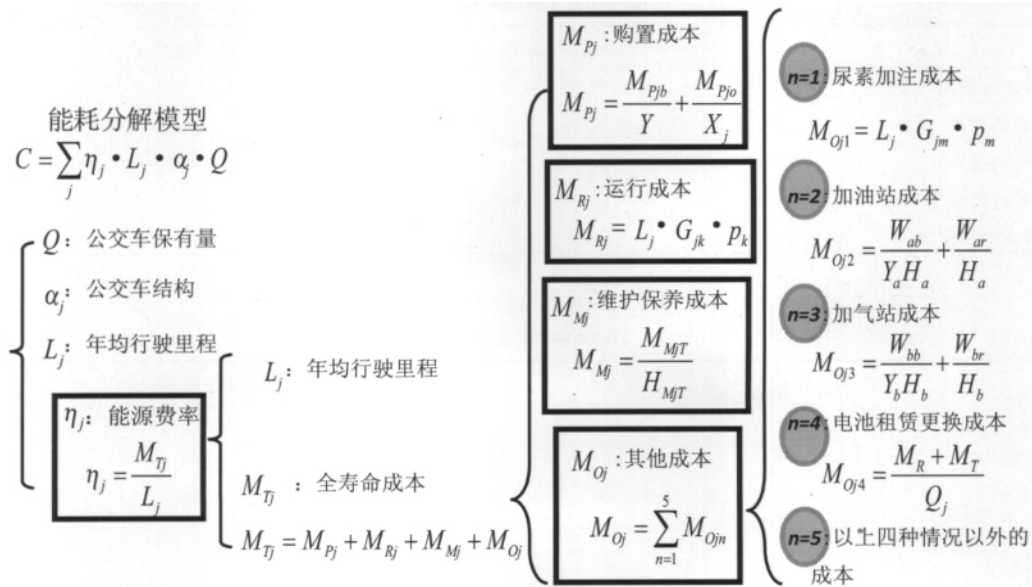


图 1 公交子系统能耗结构关系图

Fig. 1 The urban public traffic system energy consumption structure diagram

#### 4 常规公交子系统能源消耗案例分析

以北京市 2010 年常规公交车为例,对现有五种公交车型:柴油车、天然气车、混合动力车、无轨电车和纯电动车进行能源消耗计算分析,数据整理如表 1 和表 2 所示。

对现有公交车型进行全寿命周期成本分析,将表 1 和表 2 中的相关数据代入式(1) - 式(9),可以得到各类型公交车的购置成本、运行成本、维护保养成本、其他成本、全寿命成本。计算结果如表 3 所示。

根据计算结果可以看出柴油车购置费用较低,其它成本较小,但运行费用偏高;天然气车总体情

况与柴油车类似,但是各部分成本差距相对较小;混合动力车购置成本和运行成本偏高;无轨电车的购置成本和其他成本较高;纯电动车的主要限制是购车费用和电池租赁及更换费用太高。全寿命成本中最低的是天然气车,其次是无轨电车,柴油车的 36.20 万元与混合动力车的 33.61 万元接近;纯电动车全寿命成本最高,为 58.89 万元,主要原因是纯电动车的购置成本和其它成本(配套设置,主要是电池更换和租赁)偏高,分别占全寿命成本的 54.7% 和 33.9%,合计占全寿命成本的 88.6%,是电动车普及的重大阻碍。

表 1 2010 年各类公交车的相关指标数据

Table 1 The related data of various types buses in 2010

	柴油车	天然气车	混合动力车	无轨电车	纯电动车
保有量(辆)	16 642	3 133	860	640	100
全车寿命(年)	8	8	8	8	8
单车价格(万元)	60	81	127	108	133
百公里能耗	39.89 升	47 立方米	30.77 升	110 度	126 度
年均行驶里程(百公里)	725.60	582.78	523.26	417.50	376.18
能源单价	7.14 元/升	3.4 元/立方米	7.14 元/升	0.781 元/度	0.781 元/度
维护保养成本(万元)	7.38	6.46	5.54	4.85	3.00
各类型车比例	77.86%	14.66%	4.02%	2.99%	0.47%

数据来源:北京公交网,北京市统计年鉴 2010。

表2 不同类型公交车的其他成本

Table 2 The other cost of various types buses

单位:万元

	柴油车	天然气车	混合动力车	无轨电车	纯电动车
尿素加注费用	0.52	—	0.52	—	—
加油站费用	0.13	—	0.13	—	—
加气站费用	—	0.76	—	—	—
电池租赁及更换费用	—	—	—	—	20
电网及变电站费用	—	—	—	6	—

表3 不同类型公交车的成本

Table 3 The cost of various types buses

(单位:万元)

	车辆购置成本	运行成本	维护保养成本	其他成本	全寿命成本
柴油车	7.5	20.67	7.38	0.65	36.20
天然气车	10.13	9.31	6.46	0.76	26.66
混合动力车	15.92	11.50	5.54	0.65	33.61
无轨电车	13.5	3.59	4.85	6	27.94
纯电动车	32.19	3.70	3	20	58.89

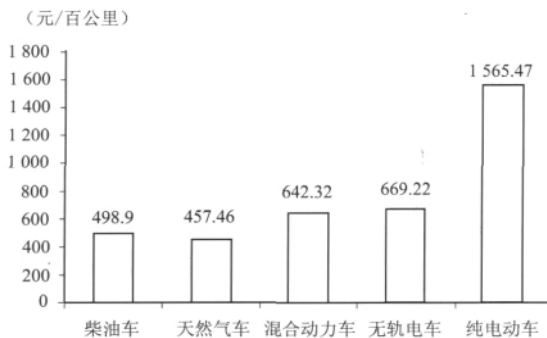


图2 不同类型公交车能源费率比较

Fig. 2 The comparison of various types buses energy rate

将公交车的全寿命周期成本代入式(10)可以计算出各类公交车的能源费率.从不同类型公交车能源费率比较结果(如图2所示)可以看出天然气的能源费率最低,仅为457.46元/百公里;纯电动车经济型最差,为1565.47元/公里,约为天然气的3.4倍;其余类型的公交车能源费率相差不多,基本维持在600元/百公里上下.

根据城市公交子系统能耗模型式(11),应用上述数据可以计算出柴油车、天然气车、混合动力车、无轨电车和纯电动车能耗费用分别为60.24亿元、8.35亿元、2.89亿元、1.79亿元和0.59亿元,其费用构成比例:柴油车81.56%;天然气车11.32%;混合动力车3.91%;无轨电车2.12%;纯电动车0.79%.

可以看出柴油车依然是公交系统能耗费用的

骨干,约占能耗总费用的81.56%;纯电动车能耗费用最少;天然气车、混合动力车、无轨电车的能耗费用与柴油车相比也相对偏少.在未来一段时期内,汽车能源仍将以燃料油为主,新能源公交车发展刚刚起步,所发挥的替代石油效果还不明显,技术有待进步.大力调整公交系统中新能源车辆的比例,应充分发挥电能及天然气的替代燃料油效果.纯电动车保有量偏少,技术有待进步,大力推广纯电动车还需突破电池的瓶颈限制.

## 5 研究结论

通过以上的分析可以得出,基于能源费率的城市公交子系统能耗模型的建立可以方便有效地计算各类公交车的能源消耗情况.截至目前,我国城市公共交通发展迅速,规模不断扩大,然而对于城市公共交通系统能源消耗的研究很少.本文所研究建立的城市公交子系统能耗模型,具有一定的实践意义,可供相关的公交能源评价研究和决策部门参考.

### 参考文献:

- [1] 陈亚妮.北京市能源消费的结构与动态分析研究[D].北京:北京化工大学,2008. [CHENG Y N. The energy consumption structure of Beijing and dynamic analysis research [D]. Beijing: Beijing University of Chemical technology, 2008.]
- [2] 窦凌凌.城市交通运输效率评价研究[D].西安:长安

- 大学, 2010. [DOU L L. Research on urban transportation efficiency [D]. Xian: Chang'an University, 2010.]
- [3] 张明. 基于指数分解的我国能源相关 CO<sub>2</sub> 排放及交通能耗分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009. [ZHANG M. Emissions of CO<sub>2</sub> and traffic energy consumption analysis in China based on index decomposition [D], Dalian University Science & Technology 2009.]
- [4] James Cooper, Tim Ryley, Austin Smyth, et al. Energy use and transport correlation linking personal and travel related energy uses to the urban structure [J]. Environmental Science & Policy 2001, 4(6): 307-318.
- [5] Jeffrey Skeera, Yanjia Wang. China on the move: Oil price explosion? [J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 678-691.
- [6] 冯建学. 基于全寿命周期能耗理论的建筑节能战略研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2007. [FENG J X. Building energy conservation strategy research based on the life cycle energy consumption theory [D]. Tianjin: Tianjin University of technology, 2007.]
- [7] 任玉珑, 李海峰, 孙睿, 等. 基于消费者视角的电动汽车全寿命周期成本模型及分析 [J]. 技术经济, 2009, 28(11): 54-58. [REN Y L, LI H F, SUN R, et al. Analysis on model of life cycle cost of electric vehicle based on consumer perspective [J]. Technology Economics 2009, 28(11): 54-58.]
- [8] 贾顺平, 毛保华, 刘爽, 等. 中国交通运输能源消耗水平测算与分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(1): 22-27. [JIA S P, MAO B H, LIU S, et al. Calculation and analysis of transportation energy consumption level in China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology 2010, 10(1): 22-27.]